Procédé généraux de construction

4è Année

Option Construction



CONFORME AU PROGRAMME NATIONAL

EDITION 2025



TABLE DE MATIERE

Préliminaire 1
Objectifs du cours 1
Approche Pédagogique 1
Compétences Visées 1
Modalités d'Évaluation 2
Partie I 4
Chapitre 1 : Le Diagnostic des Sols et les Stratégies d'Amélioration 5
1.1. L'Identification des Sols à Problèmes 5
- 1.1.1. Les Argiles Molles et Compressibles 💧 5
- 1.1.2. Les Sables Lâches et Liquéfiables 🏖️ 6
- 1.1.3. Les Vases et Sols Organiques 🌿 7
- 1.1.4. Les Remblais Hétérogènes et Non Contrôlés 🧱 8

1.2. Les Risques Associés : Tassements et Glissements 11
- 1.2.1. Le Phénomène du Tassement des Sols 📉 11
- 1.2.2. Le Tassement Différentiel et ses Conséquences Structurelles 🏚️ 12
- 1.2.3. Le Risque de Glissement de Terrain 🛷 13
- 1.3. Les Essais Géotechniques Spécifiques 17
- 1.4. L'Objectif et la Classification des Techniques d'Amélioration 22

1.3. Les Essais Géotechniques Spécifiques 27
- 1.3.1. L'Essai Œdométrique : La Mesure de la Compressibilité 🔬 ..27
- 1.3.2. L'Essai Triaxial : La Détermination de la Résistance au Cisaillement 💪 29

1.4. L'Objectif et la Classification des Techniques d'Amélioration 31
- 1.4.1. Les Objectifs Fondamentaux de l'Amélioration des Sols 🎯 ..31
- 1.4.2. Classification des Techniques d'Amélioration ⏳ 32

Scenarios et Exercices 35
- Exercices d'application ✍️ 35

- Scénarios d'assimilation 🧐 37

Chapitre 2 : L'Amélioration des Sols par Action Mécanique 45

2.1. Le Compactage en Place : Techniques et Contrôles 45

- 2.1.1. Le Compactage Dynamique 💥 45
- 2.1.2. La Vibrocompaction (ou Vibroflottation) 🌊 47

2.2. La Précompression des Sols par Préchargement 51

- 2.2.1. Le Principe du Préchargement ⏳ 51
- 2.2.2. L'Optimisation avec les Drains Verticaux 💧 53

2.3. La Substitution de Sol : Remplacement et Purge.....56

- 2.3.1. Le Principe et le Domaine d'Application de la Purge 🚜 56
- 2.3.2. La Sélection et la Mise in Œuvre des Matériaux de Substitution 🧱 57
- 2.3.3. Avantages, Inconvénients et Contrôles ✅❌ 59

2.4. Le Renforcement par Inclusions Rigides et Colonnes Ballastées 62

- 2.4.1. Le Principe du Renforcement par Inclusions 🏛️ 62
- 2.4.2. Les Colonnes Ballastées (Stone Columns) 🪨 63
- 2.4.3. Les Inclusions Rigides (Rigid Inclusions) ⛓️ 64

Scenarios et Exercices 67

- Exercices d'application ✍️ 67
- Scénarios d'assimilation 🧐 69

Chapitre 3 : L'Amélioration des Sols par Injection 79

3.1. Le Principe des Injections de Sol 79

- 3.1.1. Les Modes de Propagation du Coulis 💧 79
- 3.1.2. Le Matériel et la Méthodologie d'Exécution 🛠️ 82
- 3.1.3. Les Paramètres de Contrôle : Pression, Débit, et Rayon d'Action 📈 82

3.2. L'Injection de Coulis de Ciment pour la Consolidation.....85

- 3.2.1. Composition et Propriétés des Coulis à Base de Ciment 🍼 ..85

- 3.2.2. Domaines d'Application pour la Consolidation 🏗️ 86

3.3. L'Injection de Produits Chimiques pour l'Étanchéification.....89

- 3.3.1. Les Coulis Chimiques : Principes et Avantages 🔬 89
- 3.3.2. Les Gels de Silicate de Sodium 💧 90
- 3.3.3. Les Résines Synthétiques (Polyuréthanes et Acryliques) 🧪 .92
- 3.3.4. Le Jet Grouting : Une Technique d'Injection par Hydro-Fracturation à Haute Énergie 🌀 92

3.4. Le Contrôle de l'Efficacité des Traitements par Injection.....96

- 3.4.1. Les Contrôles Préliminaires et Pendant l'Exécution 📋 96
- 3.4.2. Les Méthodes de Contrôle pour les Objectifs de Consolidation ✅ 97
- 3.4.3. Les Méthodes de Contrôle pour les Objectifs d'Étanchéité 🌊 97

Scenarios et Exercices 100

- ✍️ Exercices d'application 100
- scenarios d'assimilation 103

RESSOURCES COMPLEMENTAIRES.....109

🧐 Questions et reponses d'approffondissement.....109

⚠️ Confusions et erreurs frequentes a eviter 116

- 1. Confondre Compactage et Consolidation.....116
- 2. Penser que le "Jet Grouting" est une simple injection sous haute pression.....117
- 3. Croire qu'un bon compactage garantit l'absence de tassements futurs 118
- 4. Appliquer le Compactage Dynamique aux mauvais types de sol119

📝 La fiche de revision prete a l'emploi 120

- Chapitre 1 : Le Diagnostic des Sols et les Stratégies d'Amélioration 120
- Chapitre 2 : L'Amélioration des Sols par Action Mécanique.....122
- Chapitre 3 : L'Amélioration des Sols par Injection.....124

.....126
Partie II 127
Chapitre 4 : Les Fondamentaux de l'Hydraulique Souterraine 128
4.1 La Notion de Nappe Phréatique et de Pression Interstitielle 128
- 4.1.1 Définition et Caractérisation de la Nappe Phréatique 128
- 4.1.2 La Pression Interstitielle et la Notion de Contrainte Effective129
- 4.1.3 La Sous-Pression et la Poussée d'Archimède sur les Structures 130

4.2 La Perméabilité des Sols et la Loi de Darcy 133
- 4.2.1 Définition et Importance de la Perméabilité 133
- 4.2.2 L'Expérience Fondamentale et l'Énoncé de la Loi de Darcy ..134
- 4.2.3 Le Coefficient de Perméabilité (k) : Échelle de Valeurs 137
- 4.2.4 Méthodes de Mesure de la Perméabilité 137

4.3 Le Problème des Sous-pressions.....140
- 4.3.1 Origine et Mécanisme de la Sous-pression.....140
- 4.3.2 Facteurs Aggravants et Situations à Risque 140
- 4.3.3 Conséquences et Modes de Rupture Potentiels 141
- 4.3.4 Stratégies de Conception et Solutions Constructives.....142

4.4 Le Phénomène de Boulance dans les Fouilles 144
- 4.4.1 Description du Mécanisme Hydraulique 144
- 4.4.2 Le Gradient Hydraulique Critique et l'Annulation de la Contrainte Effective 144
- 4.4.3 Conditions d'Apparition et Conséquences sur le Chantier 147
- 4.4.4 Méthodes de Prévention et de Contrôle.....147

🛠️ Scenarios et Exercices.....150
- 1. Texte à compléter sur les écoulements et la loi de Darcy 150
- 2. Texte à compléter sur la stabilité d'un ouvrage face à la sous-pression.....150
- 3. Texte à compléter sur le phénomène de boulance 151
- 4. Calcul de contraintes dans le sol.....151

- 5. Stabilité au soulèvement d'un réservoir.....152
- 6. Vérification du risque de boulance.....152
- Scénario 1 : Conception d'un radier de sous-sol à Kinshasa 153
- Scénario 2 : Interprétation d'un essai de pompage à Likasi.....155
- Scénario 3 : Stabilité d'un batardeau à Kisangani 157

Chapitre 5 : Les Techniques d'Assèchement des Fouilles.....160

5.1 L'Épuisement à Ciel Ouvert par Pompage 160

- 5.1.1 Principe de la Méthode.....160
- 5.1.2 Domaine d'Application et Limites Fondamentales.....161
- 5.1.3 Risques Associés et Bonnes Pratiques de Mise en Œuvre 161

5.2 Le Rabattement de Nappe par Pointes Filtrantes.....165

- 5.2.1 Principe de Fonctionnement et Composants du Système 165
- 5.2.2 Domaine d'Application et Critères de Faisabilité 168
- 5.2.3 Conception et Mise en Œuvre sur Chantier.....169

5.3 Le Rabattement par Puits Profonds.....172

- 5.3.1 Principe et Composants Clés.....172
- 5.3.2 Domaine d'Application et Avantages 173
- 5.3.3 Conception et Mise en Œuvre.....174

5.4 L'Encuvement par une Enceinte de Palplanches.....177

- 5.4.1 Principe de l'Exclusion de l'Eau 177
- 5.4.2 Les Palplanches Métalliques : Matériau et Mise en Œuvre....177
- 5.4.3 Étanchéité et Stabilité de l'Enceinte 180

🛠️ Scenarios et Exercices.....183

- 1. Texte à compléter sur les risques du pompage à ciel ouvert.....183
- 2. Texte à compléter sur l'installation d'un réseau de pointes filtrantes 183
- 3. Texte à compléter sur les enceintes étanches 184
- 4. Choix de la méthode d'assèchement.....184
- 5. Conception simplifiée d'un réseau de pointes filtrantes 185

- 6. Fonctionnement d'un batardeau 185
- Scénario 1 : Assèchement d'une fouille profonde en milieu urbain à Kinshasa 186
- Scénario 2 : Tranchée pour un émissaire en zone côtière à Banana 188
- Scénario 3 : Fondation d'un grand pylône haute tension dans la Cuvette Centrale 190

RESSOURCES COMPLEMENTAIRES 192

🧐 Questions et reponses d'approffondissement 192

⚠️ Confusions et erreurs frequentes a eviter 197

- 1. Croire qu'un sol "étanche" ne pose aucun problème de sous-pression 197
- 2. Confondre la vitesse de Darcy et la vitesse réelle de l'eau 198
- 3. Penser que le but d'un rabattement de nappe est de "sécher" le sol 199
- 4. Sous-estimer l'impact à distance d'un pompage par puits profonds 200
- 5. Omettre de prendre en compte les variations saisonnières de la nappe phréatique 201

📝 La fiche de revision prete a l'emploi 201

- Chapitre 4 : Les Fondamentaux de l'Hydraulique Souterraine 202
- Chapitre 5 : Les Techniques d'Assèchement des Fouilles 204

Partie III 208

Chapitre 6 : Les Ouvrages de Protection Contre l'Eau (Batardeaux) 209

6.1 Le Rôle et la Conception d'un Batardeau 209

- 6.1.1 Fonction et Objectifs du Batardeau 209
- 6.1.2 Principes Fondamentaux de Conception 209
- 6.1.3 Les Principaux Modes de Rupture à Considérer 213

6.2 Le Batardeau en Remblai de Terre 216

- 6.2.1 Principe Constructif et Domaine d'Application 216
- 6.2.2 Composition Type d'un Batardeau en Terre 216

- 6.2.3 Stabilité et Points de Vigilance 218

6.3 Le Batardeau par Enceinte de Palplanches 221

- 6.3.1 Principe et Avantages Fondamentaux.....221
- 6.3.2 Typologies Constructives.....221
- 6.3.3 Stabilité et Points de Vigilance.....223

6.4 La Stabilité et la Sécurité des Batardeaux.....226

- 6.4.1 L'Analyse de Stabilité Externe.....226
- 6.4.2 La Maîtrise des Infiltrations et des Pressions Internes 227
- 6.4.3 La Surveillance et la Gestion des Risques en Cours de Chantier 230

🛠️ Scenarios et Exercices.....232

- 1. Texte à compléter sur la conception et la sécurité des batardeaux 232
- 2. Texte à compléter sur la structure d'un batardeau en remblai ..232
- 3. Analyse des modes de rupture d'un batardeau cellulaire 233
- 4. Calcul de stabilité au renversement 233
- 5. Calcul de stabilité au glissement.....234
- 6. Choix de la technologie de batardeau 234
- Scénario 1 : Conception d'un batardeau cellulaire pour un grand pont à Matadi 235
- Scénario 2 : Batardeau à double paroi pour une prise d'eau sur la rivière Lualaba 236
- Scénario 3 : Batardeau en remblai pour un chantier rural au Kasaï 238

Chapitre 7 : La Protection Contre les Affouillements.....241

7.1 Le Phénomène d'Affouillement au Pied des Piles de Pont.....241

- 7.1.1 Description Générale du Mécanisme.....241
- 7.1.2 La Mécanique des Fluides de l'Affouillement Local.....241
- 7.1.3 Facteurs Influents sur la Profondeur d'Affouillement 245

7.2 La Protection par Abaissement du Niveau de Fondation 248

- 7.2.1 Le Principe de la Sécurité par la Profondeur 248
- 7.2.2 L'Évaluation de la Profondeur d'Affouillement Maximale (ys) 248
- 7.2.3 Application aux Systèmes de Fondation.....249

7.3 La Protection par Enrochements et Perrés.....252

- 7.3.1 Le Principe de la Protection par Blindage (Armoring).....252
- 7.3.2 La Protection par Enrochements Libres (Riprap) 252
- 7.3.3 Les Perrés Maçonnés ou Bétonnés.....253

7.4 La Protection par Gabions et Matelas 256

- 7.4.1 Principe Constructif et Composants.....256
- 7.4.2 Avantages et Domaines d'Application 257
- 7.4.3 Mise en Œuvre et Points de Vigilance.....260

🛠️ Scenarios et Exercices.....263

- 1. Texte à compléter sur le mécanisme de l'affouillement local.....263
- 2. Texte à compléter sur la conception d'une protection en enrochements 263
- 3. Influence de la forme d'une pile de pont.....264
- 4. Conception de la profondeur d'une fondation 264
- 5. Utilisation des gabions en protection de berge 265
- 6. Comparaison de techniques de protection de pied de pile 265
- Scénario 1 : Conception de la fondation d'un pont majeur sur le fleuve Congo 266
- Scénario 2 : Protection d'une berge menacée par l'érosion à Kisangani 268
- Scénario 3 : Stabilisation d'une tête de ravinement à Mbuji-Mayi..269

Chapitre 8 : La Maîtrise des Sous-pressions et de l'Érosion Interne.....272

8.1 La Théorie des Lignes de Courant sous un Barrage.....272

- 8.1.1 Le Concept du Réseau d'Écoulement.....272
- 8.1.2 Quantification des Paramètres Hydrauliques à partir du Réseau 273

8.2 L'Application des Règles de Bligh et de Lane 274
- 8.2.1 Le Risque du Renard Hydraulique (Piping).....274
- 8.2.2 La Règle de Bligh (Weighted-Creep Theory) 275
- 8.2.3 La Règle de Lane (Weighted-Creep Theory Améliorée).....275

8.3 Les Dispositifs pour Augmenter le Chemin de Percolation 277
- 8.3.1 Le Principe de l'Allongement du Parcours Hydraulique.....277
- 8.3.2 Les Parafouilles (Cutoff Walls) 277
- 8.3.3 Le Tapis Amont (Upstream Blanket).....278

8.4 Les Filtres et Drains pour Prévenir l'Érosion Interne 279
- 8.4.1 Le Rôle Fondamental du Filtre 279
- 8.4.2 Le Filtre Granulaire Inversé et les Critères de Terzaghi.....280
- 8.4.3 Les Filtres Géotextiles 280
- 8.4.4 L'Association Indispensable du Filtre et du Drain.....281

🛠️ Scenarios et Exercices.....282
- 1. Texte à compléter sur la prévention du renard hydraulique.....282
- 2. Texte à compléter sur la conception d'un système filtre-drain ..282
- 3. Application de la règle de Bligh 283
- 4. Application de la règle de Lane.....283
- 5. Interprétation d'un réseau d'écoulement.....283
- 6. Vérification d'un filtre granulaire.....284
- Scénario 1 : Conception du système d'étanchéité et de drainage d'un barrage en terre.....284
- Scénario 2 : Diagnostic et réparation d'un seuil sur la rivière Inkisi 286
- Scénario 3 : Conception de la fondation d'un barrage mobile sur une plaine alluviale 287

RESSOURCES COMPLEMENTAIRES.....290

😳 Questions et reponses d'approffondissement.....290

⚠️ Confusions et erreurs frequentes a eviter 296
- 1. Penser qu'un batardeau est simplement un mur étanche 296

- 2. Considérer que la profondeur d'affouillement se mesure depuis le lit actuel de la rivière 297
- 3. Utiliser n'importe quelle pierre disponible pour les enrochements ou les gabions 298
- 4. Omettre la couche de filtre sous une protection par blindage ...299

📝 La fiche de revision prete a l'emploi 300

- Chapitre 6 : Les Batardeaux - Créer un Espace de Travail au Sec .300
- Chapitre 7 : L'Affouillement - Comprendre et Combattre l'Érosion Fluviale.....301
- Chapitre 8 : La Maîtrise des Infiltrations et de l'Érosion Interne....303

ANNEXES ..... a

Explication des concepts utilisés i

- Concepts Fondamentaux de la Géotechnique 🌍 i
- Matériaux de Construction 🛠️ v
- Éléments de Structure 🏛️ vi
- Techniques de Mise en Œuvre ✍️ viii
- Notions Générales du Chantier 🗺️ ix



Préliminaire

Objectifs du cours

Ce cours terminal a pour ambition de confronter le futur technicien supérieur aux défis les plus complexes du génie civil : la construction sur des terrains difficiles et en présence d'eau. L'objectif est de maîtriser un éventail de procédés spéciaux qui permettent de modifier les propriétés d'un sol, de travailler sous le niveau de la nappe phréatique et de protéger les ouvrages contre les actions agressives de l'eau. Il s'agit de former un professionnel capable d'analyser une situation géotechnique et hydraulique complexe et de participer au choix et à la supervision de la mise en œuvre de solutions techniques avancées. 🌊

Approche Pédagogique

Structuré comme un manuel de résolution de problèmes, l'enseignement partira systématiquement d'un défi constructif (un sol médiocre, une fouille inondée, un risque d'affouillement) pour en explorer les différentes solutions technologiques. Chaque procédé sera analysé sous l'angle de son principe de fonctionnement, de son domaine d'application, de ses avantages et de ses limites. L'apprentissage sera enrichi par l'étude de cas concrets, en analysant les techniques de consolidation des sols pour un grand bâtiment à Kinshasa ou les méthodes de protection des piles du pont Maréchal contre les affouillements du fleuve Congo.

Compétences Visées

Au terme de cette année, l'élève détiendra les compétences suivantes :

- Diagnostiquer : Identifier les problématiques liées à un sol de faibles caractéristiques ou à la présence d'eau, et comprendre les risques associés pour un projet de construction.
- Analyser : Expliquer le principe de fonctionnement, le domaine d'emploi et les limites des principales techniques d'amélioration des sols et de travaux en site aquatique.
- Proposer : Participer au choix de la méthode de fondation ou de protection la plus pertinente face à une contrainte géotechnique ou hydraulique donnée.

- Décrire : Détailler les grandes phases de mise en œuvre d'un procédé de construction spécial, comme le rabattement de nappe ou la construction d'un batardeau.

Modalités d'Évaluation

L'évaluation mesurera la capacité de l'élève à analyser des situations complexes et à proposer des solutions technologiques argumentées. Elle se composera d'études de cas basées sur des rapports géotechniques et des contextes de chantier difficiles, et d'épreuves écrites testant la connaissance approfondie des différents procédés. Un projet final de synthèse demandera à l'élève d'élaborer une note technique proposant et justifiant une ou plusieurs solutions pour la réalisation d'un ouvrage fictif dans des conditions de site particulièrement contraignantes. 👷

Éditions Donel C.
Direction Éditoriale et Conception Générale :
MURHULA BAZIKANGE M.
Pour contacts, mon site web :
https://murhulabazikange.com/

© 2025, Donel Consulting, Kin. RDC
Tous droits réservés.

Pour l'excellence de l'éducation en RDC,
Tous les manuels scolaires en un seul endroit,
sur ce site web :
https://manuels-scolaires-rdc.com/

Pour plus de détails, scannez ceci :

Partie I

Les Techniques d'Amélioration et de Traitement des Sols

Cette partie est consacrée aux techniques qui permettent de construire sur des terrains aux caractéristiques médiocres. Plutôt que de recourir systématiquement à des fondations profondes coûteuses, il est souvent possible d'améliorer les propriétés du sol en place pour le rendre apte à supporter l'ouvrage.



Chapitre 1 : Le Diagnostic des Sols et les Stratégies d'Amélioration

Avant de traiter un sol, il faut établir un diagnostic précis de ses faiblesses et définir une stratégie d'intervention.

1.1. L'Identification des Sols à Problèmes

Une typologie des sols posant des défis particuliers à la construction est dressée : argiles molles et compressibles, sables lâches et liquéfiables, vases, remblais non contrôlés, etc.

1.1.1. Les Argiles Molles et Compressibles

Les argiles molles et compressibles représentent une catégorie de sols fins dont le comportement mécanique constitue un défi majeur pour l'ingénieur en construction. Leur identification sur un site est la première étape cruciale avant tout projet de fondation.

- **Composition et Structure** : Ces sols sont principalement constitués de particules minérales très fines (inférieures à 2 micromètres), les argilites, qui présentent une structure en feuillets. Cette structure lamellaire leur confère une grande affinité pour l'eau. Les molécules d'eau viennent se loger entre les feuillets, provoquant une augmentation du volume interstitiel et une diminution significative des forces de contact entre les grains solides. La teneur en eau naturelle de ces argiles est souvent très élevée, parfois proche de leur limite de liquidité, ce qui leur donne une consistance molle, voire plastique. La présence de minéraux comme la montmorillonite accentue ce phénomène en raison de sa forte capacité d'adsorption d'eau.
- **Caractéristiques Géotechniques** :
  - **Faible Portance** : La capacité portante d'un sol argileux mou est extrêmement faible. Sous l'application d'une charge, même modérée, la pression interstitielle de l'eau contenue dans les pores augmente considérablement. Comme l'eau est quasi incompressible et que la perméabilité de l'argile est très faible, cette surpression ne se dissipe que très lentement. Le squelette solide du sol ne supporte donc qu'une faible partie de la charge appliquée, ce qui conduit à des risques élevés de poinçonnement et de rupture du sol sous les fondations.

- **Grande Compressibilité** : Ces sols subissent des déformations volumiques importantes sous l'effet des charges. Ce phénomène, appelé consolidation, résulte de l'expulsion lente et progressive de l'eau interstitielle. Le tassement qui en résulte peut atteindre des amplitudes considérables (plusieurs dizaines de centimètres) et se développer sur de très longues périodes, parfois plusieurs décennies après la fin de la construction de l'ouvrage. Cette caractéristique rend la prévision des tassements finaux et de leur cinétique particulièrement complexe.
- **Faible Résistance au Cisaillement non drainé** : En conditions non drainées (c'est-à-dire à court terme, lorsque l'eau n'a pas le temps de s'évacuer), la résistance au cisaillement de ces argiles est très faible. Cette résistance est principalement due à la cohésion non drainée (C_u), qui peut être mesurée in situ avec un scissomètre de chantier. Une faible valeur de C_u indique un risque élevé d'instabilité, notamment pour les talus, les excavations et les fondations superficielles.

- **Contexte Congolais** : En République Démocratique du Congo, des formations d'argiles molles se rencontrent fréquemment dans les zones alluvionnaires le long du fleuve Congo et de ses affluents, ainsi que dans les plaines littorales près de Moanda. Les projets de construction dans ces zones exigent des études géotechniques approfondies pour caractériser précisément le comportement de ces sols et concevoir des solutions de fondations adaptées (fondations profondes, amélioration de sol, etc.).

1.1.2. Les Sables Lâches et Liquéfiables

Les sables lâches, bien que classés comme sols granulaires, peuvent présenter des risques tout aussi critiques que les argiles molles, notamment le phénomène dévastateur de la liquéfaction.

- **État de Compacité** : Un sable est qualifié de "lâche" lorsque son indice des vides est élevé, ce qui signifie que les grains sont arrangés de manière peu compacte, avec un volume de vides important entre eux. Cet état de faible compacité, mesurable par des essais de pénétration dynamique (SPT) ou statique (CPT), est le principal indicateur du potentiel de problèmes. Un faible nombre de coups au SPT (N < 10) est souvent un signe d'alerte.
- **Le Phénomène de Liquéfaction** : La liquéfaction est un processus par lequel un sol saturé en eau perd temporairement et subitement toute sa résistance au cisaillement et se comporte comme un liquide visqueux. Ce

phénomène est déclenché par une sollicitation dynamique rapide, le plus souvent un séisme, mais parfois aussi des vibrations intenses dues à des travaux (battage de pieux, trafic lourd).

  - **Mécanisme** : Sous l'effet des vibrations, la structure lâche des grains de sable tend à se réarranger pour atteindre un état plus dense. Ce réarrangement brutal provoque une augmentation quasi instantanée de la pression de l'eau dans les pores (pression interstitielle). Si cette pression interstitielle atteint une valeur égale à la contrainte totale verticale, la contrainte effective entre les grains devient nulle. Les grains de sable se retrouvent alors en suspension dans l'eau, et le sol n'a plus aucune capacité à supporter des charges.

  - **Conséquences** : Les bâtiments construits sur un sol liquéfié peuvent s'enfoncer, basculer ou subir des ruptures de fondations. Les infrastructures enterrées (canalisations, réservoirs) peuvent remonter à la surface par flottabilité. Des fissures et des éjections de sable et d'eau ("volcans de sable") peuvent apparaître au niveau du sol.

- **Identification et Localisation** : Les sables potentiellement liquéfiables sont généralement des sables fins à moyens, uniformes (à granulométrie serrée), saturés et présentant une faible compacité. On les retrouve typiquement dans les dépôts alluvionnaires récents, les deltas, les zones côtières et les remblais hydrauliques non compactés. Dans le contexte de la RDC, les zones situées dans le Graben Est-Africain, comme la région des Kivu, sont soumises à une activité sismique qui rend l'identification de ces sables particulièrement cruciale pour la sécurité des constructions.

1.1.3. Les Vases et Sols Organiques

Les vases et les sols riches en matières organiques sont des matériaux géotechniquement très médiocres, souvent considérés comme impropres à la construction sans un traitement préalable lourd.

- **Composition et Formation** : La vase est un dépôt sédimentaire récent, à granulométrie très fine (mélange de silts et d'argiles), saturé en eau et contenant une part significative de matières organiques en décomposition. Les sols organiques, quant à eux, se caractérisent par une teneur en matière organique supérieure à 10-20%. Ces sols se forment dans des environnements à faible énergie (marais, lagunes, fonds de lacs, estuaires) où la décomposition de la végétation est lente et incomplète.

- **Caractéristiques Géotechniques Exécrables** :
  - **Très Forte Compressibilité** : La présence de matière organique fibreuse et la teneur en eau extrêmement élevée (souvent supérieure à 100%) rendent ces sols exceptionnellement compressibles. Ils subissent un tassement primaire important (consolidation), suivi d'un tassement secondaire (fluage) qui peut se poursuivre indéfiniment sous charge constante, dû à la réorientation des fibres organiques et à la décomposition continue.
  - **Résistance au Cisaillement quasi nulle** : La résistance mécanique de ces sols est extrêmement faible. Ils n'offrent pratiquement aucune portance et sont incapables de supporter la moindre charge de construction sans subir de déformations excessives ou une rupture.
  - **Propriétés Évolutives** : Le comportement de ces sols est instable dans le temps. La décomposition biochimique des matières organiques modifie en continu leurs propriétés physiques et mécaniques, rendant toute prévision à long terme très incertaine. Cette décomposition peut également produire des gaz (comme le méthane) et des composés acides corrosifs pour les fondations en béton ou en acier.
- **Stratégie de Construction** : En règle générale, la meilleure stratégie consiste à éviter de construire sur de tels sols. Lorsque cela est inévitable, il est souvent nécessaire de purger et de remplacer entièrement le matériau sur une profondeur significative, ou de recourir à des fondations profondes (pieux) qui traversent cette couche de mauvaise qualité pour s'ancrer dans un substratum plus résistant.

1.1.4. Les Remblais Hétérogènes et Non Contrôlés

Les remblais constituent des sols artificiels, mis en place par l'homme. Leur qualité et leur fiabilité dépendent entièrement des matériaux utilisés et de la méthode de mise en œuvre. Les remblais non contrôlés sont une source majeure de sinistres en construction.

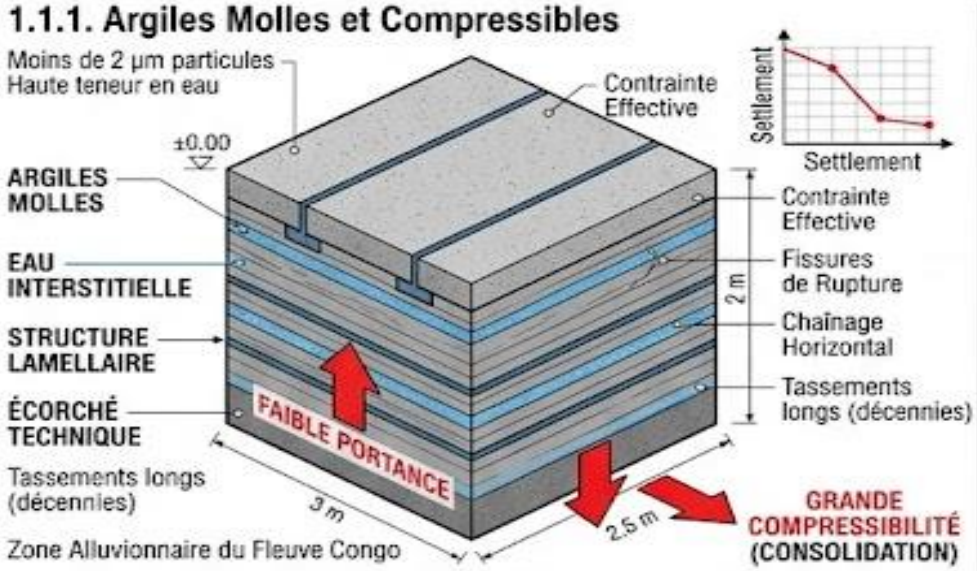
- **Origine et Composition** : Ces remblais proviennent souvent du comblement d'anciennes carrières, de dépressions topographiques ou de zones gagnées sur l'eau, en utilisant des matériaux de provenances diverses sans contrôle rigoureux. Ils peuvent contenir un mélange hétérogène de sols naturels, de déchets de démolition (béton, briques),

de déchets industriels, voire de matières organiques ou de déchets ménagers. Cette hétérogénéité est leur caractéristique la plus problématique.

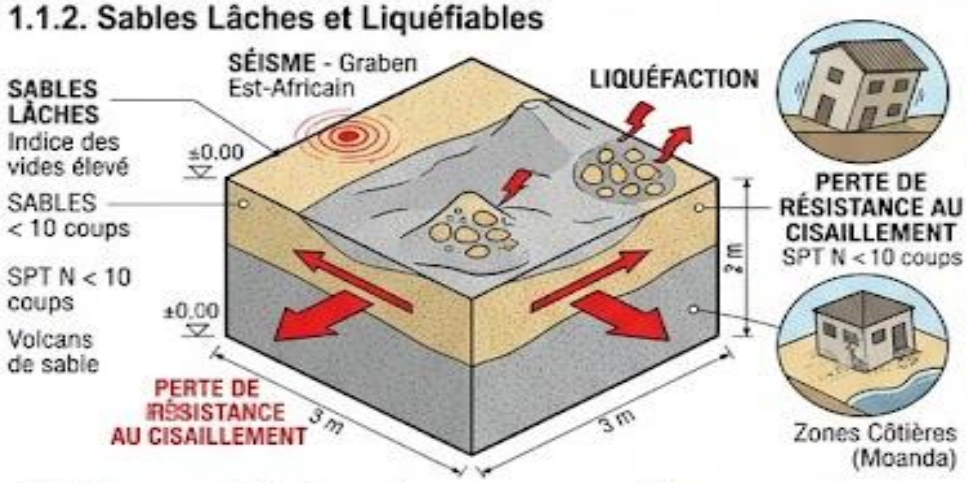
- **Problèmes Associés** :
  - **Hétérogénéité extrême** : Les propriétés géotechniques (densité, portance, compressibilité) peuvent varier de manière imprévisible sur de très courtes distances, horizontalement et verticalement. Cette variabilité rend impossible la conception de fondations superficielles qui ne subiraient pas de tassements différentiels importants.
  - **Présence de Vides** : Un compactage insuffisant ou l'utilisation de blocs de grande taille peuvent laisser des vides importants au sein du remblai. Avec le temps, les matériaux plus fins peuvent migrer dans ces vides sous l'effet de la circulation d'eau, provoquant des effondrements de surface localisés (fontis).
  - **Décomposition et Pollution** : La présence de matières organiques entraîne des tassements à long terme et la production de gaz. La présence de polluants chimiques peut contaminer le site et attaquer les matériaux de fondation.
  - **Tassements Imprévisibles** : Le poids propre du remblai lui-même peut induire des tassements qui se poursuivent pendant de nombreuses années. Toute charge supplémentaire apportée par une nouvelle construction ne fera qu'aggraver ces déformations imprévisibles.
- **Diagnostic** : L'identification d'un remblai non contrôlé nécessite une investigation historique du site (consultation d'archives, de photos aériennes anciennes) et une campagne de reconnaissance géotechnique intensive, incluant de nombreux sondages et fosses de reconnaissance pour évaluer la nature, l'épaisseur et l'hétérogénéité des matériaux en place.

PLANCHE PÉDAGOGIQUE A4 : LE DIAGNOSTIC DES SOLS & LES STRATÉGIES D'AMÉLIORATION

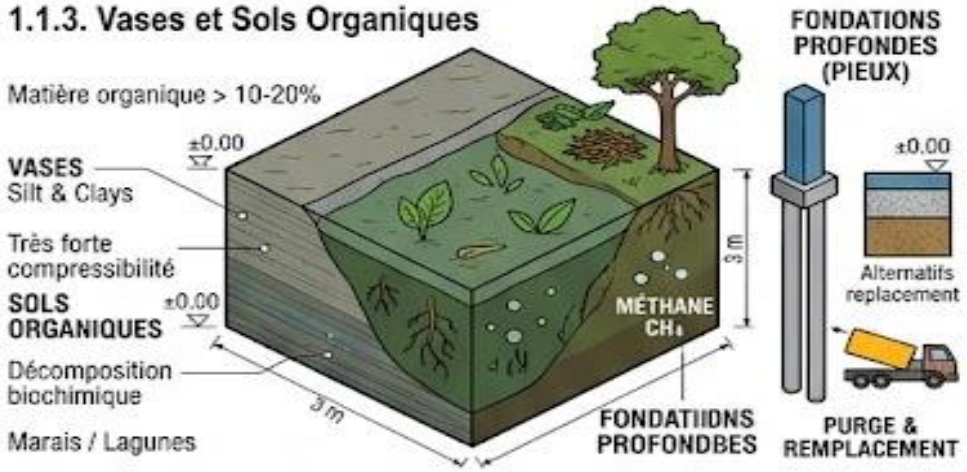
1.1.1. Argiles Molles et Compressibles



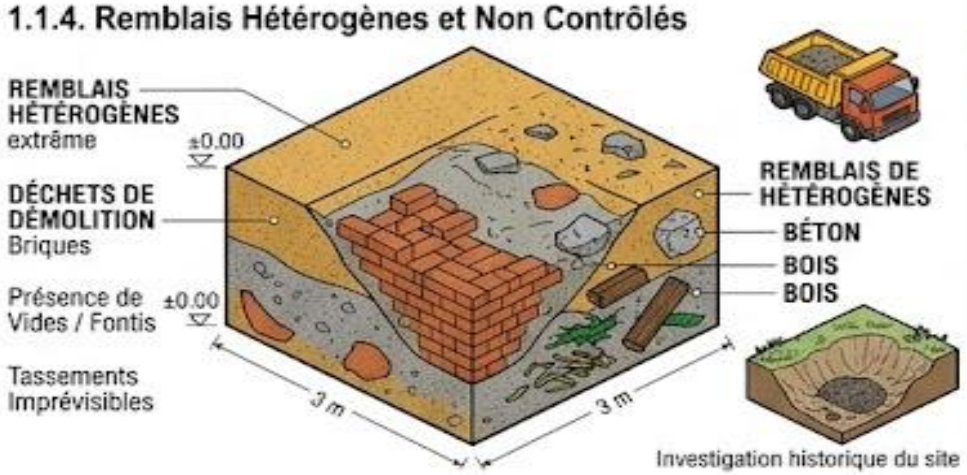
1.1.2. Sables Lâches et Liquéfiables



1.1.3. Vases et Sols Organiques



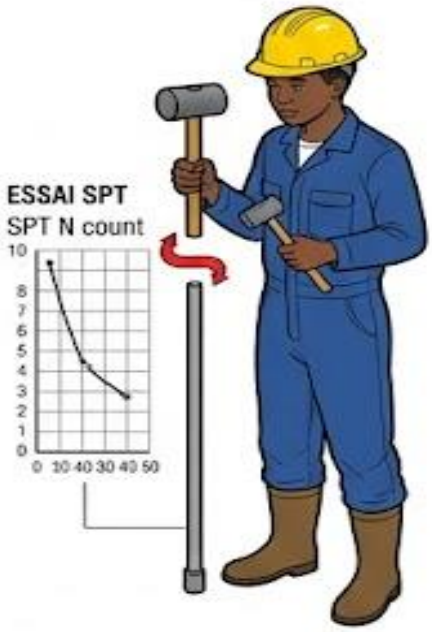
1.1.4. Remblais Hétérogènes et Non Contrôlés



FACTEUR HUMAIN & SÉCURITÉ EN RDC

(16-18 ans, mixed erat gende)







1.2. Les Risques Associés : Tassements et Glissements

Construire sur les sols précédemment identifiés sans prendre de précautions adéquates expose l'ouvrage et ses occupants à des risques majeurs, principalement les tassements et les glissements de terrain. Ces phénomènes résultent directement de l'incapacité du sol à supporter les nouvelles contraintes qui lui sont appliquées.

1.2.1. Le Phénomène du Tassement des Sols

Le tassement est la déformation verticale d'un massif de sol sous l'effet de l'application d'une charge. Bien que tout sol se déforme sous charge, c'est l'amplitude et l'hétérogénéité de ces déformations qui posent problème. On distingue principalement trois composantes du tassement total.

- **Tassement Immédiat (S_i)** : Il se produit instantanément ou très rapidement après l'application de la charge. Dans les sols granulaires (sables, graviers), il représente la quasi-totalité du tassement et résulte du réarrangement des grains et de leur déformation élastique. Dans les sols fins saturés (argiles), il est dû à une déformation à volume constant, sans expulsion d'eau. Son amplitude est généralement faible dans les argiles, mais peut être significative dans les sables lâches.
- **Tassement de Consolidation Primaire (S_c)** : Ce phénomène est spécifique aux sols fins saturés et compressibles comme les argiles molles et les vases. La charge appliquée par la construction est initialement reprise en totalité par l'eau interstitielle, créant une surpression. En raison de la très faible perméabilité du sol, cette eau est expulsée très lentement vers les couches drainantes avoisinantes. Au fur et à mesure que l'eau s'évacue, la charge est progressivement transférée au squelette solide des grains, qui se resserre. Ce processus de dissipation de la surpression interstitielle et de réduction du volume des vides constitue la consolidation. C'est un phénomène lent, qui peut s'étaler sur des années voire des décennies, et qui est responsable des tassements de grande amplitude observés sur ces sols. La théorie de la consolidation de Terzaghi permet de modéliser et de calculer l'amplitude et la vitesse de ce tassement.
- **Tassement de Consolidation Secondaire ou Fluage (S_s)** : Même après la dissipation complète des surpressions interstitielles (fin de la consolidation primaire), le sol peut continuer à tasser. Ce tassement à long terme, qui se produit sous une contrainte effective constante, est

appelé fluage. Il est particulièrement significatif dans les sols très organiques (vases, tourbes), où il est lié au réarrangement continu de la structure du sol et à la décomposition des matières organiques.

L'enjeu pour l'ingénieur est de calculer le tassement total ($S_t = S_i + S_c + S_s$) et de s'assurer que son amplitude reste dans des limites admissibles pour la structure concernée. Un tassement uniforme de quelques centimètres peut être acceptable pour un grand nombre d'ouvrages, mais un tassement de plusieurs dizaines de centimètres conduira inévitablement à des désordres majeurs.

1.2.2. Le Tassement Différentiel et ses Conséquences Structurelles

Le risque le plus dommageable pour les structures n'est pas tant le tassement total en lui-même, mais le **tassement différentiel**. Il s'agit de la différence de tassement entre deux points d'appui d'une même structure (par exemple, entre deux semelles de fondation).

- **Causes du Tassement Différentiel** :
  - **Hétérogénéité du sous-sol** : C'est la cause la plus fréquente. Si une partie du bâtiment repose sur une couche d'argile compressible et l'autre sur un sol plus rigide (sable dense, rocher), les tassements seront inévitablement inégaux. C'est un risque majeur lors de la construction sur des remblais non contrôlés.
  - **Différences de charges** : Si les charges transmises par les différents poteaux d'un bâtiment sont très variables, les zones les plus chargées tasseront davantage.
  - **Géométrie des fondations** : Des semelles de fondation de tailles différentes tasseront différemment sous une même pression de contact.
  - **Interférence entre fondations** : La présence de fondations voisines peut modifier la distribution des contraintes dans le sol et induire des tassements non uniformes.
- **Conséquences sur la Structure** : Un tassement différentiel induit des rotations et des déformations dans la structure que celle-ci n'a pas été conçue pour supporter. Ces déformations génèrent des contraintes internes supplémentaires (efforts de traction, de cisaillement, moments

de flexion) qui peuvent dépasser la résistance des matériaux. Les manifestations visibles sont :

- **Apparition de fissures** : Des fissures caractéristiques, souvent obliques (à 45°), apparaissent dans les murs en maçonnerie, les cloisons et les façades.
- **Distorsion des ouvertures** : Les portes et les fenêtres se coincent, ont du mal à s'ouvrir ou à se fermer.
- **Pentes dans les planchers** : Des inclinaisons anormales des sols deviennent perceptibles.
- **Dommages aux éléments structurels** : Des fissures peuvent apparaître dans les poutres, les dalles et les poteaux en béton armé.
- **Rupture des canalisations** : Les canalisations rigides enterrées (eau, égouts) peuvent se rompre aux jonctions.

Dans les cas les plus extrêmes, un tassement différentiel excessif peut entraîner une redistribution complète des charges dans la structure, menant à la ruine partielle ou totale de l'ouvrage. La maîtrise de ce risque passe par une reconnaissance géotechnique soignée pour détecter les hétérogénéités du sol et par une conception de fondations adaptées (radiers généraux, longrines de redressement, fondations profondes) visant à rigidifier l'ensemble et à uniformiser les tassements.

1.2.3. Le Risque de Glissement de Terrain

Le glissement de terrain est un phénomène d'instabilité de pente qui se traduit par le déplacement d'une masse de sol ou de roche le long d'une surface de rupture. Ce risque est particulièrement présent dans les zones au relief accidenté, comme dans l'Est de la RDC.

- **Mécanisme de Rupture** : La stabilité d'un talus ou d'une pente naturelle dépend de l'équilibre entre les forces motrices, qui tendent à provoquer le déplacement (principalement le poids propre du sol), et les forces résistantes, qui s'y opposent. La résistance est mobilisée le long d'une surface de rupture potentielle et dépend des caractéristiques intrinsèques du sol :
  - **La Cohésion (c')** : C'est la force d'attraction interne entre les particules du sol. Elle est importante dans les argiles et quasi nulle dans les sables propres.

  - **L'Angle de Frottement Interne (ϕ')** : Il représente la friction entre les grains du sol. Plus cet angle est élevé, plus le sol est capable de résister au glissement.

Le glissement se produit lorsque les forces motrices excèdent les forces résistantes. Le rapport entre ces deux forces définit le **coefficient de sécurité (F_s)**. Un glissement est imminent lorsque F_s s'approche de 1.

- **Facteurs Déclenchants** : Plusieurs facteurs peuvent diminuer les forces résistantes ou augmenter les forces motrices, menant à la rupture :
  - **L'eau** : C'est le facteur déclenchant le plus courant. L'infiltration d'eau de pluie dans le sol augmente son poids (force motrice) et génère des pressions interstitielles qui diminuent la résistance au cisaillement le long de la surface de rupture (diminution des forces résistantes). Une saturation complète du sol peut réduire drastiquement sa stabilité.
  - **Actions Humaines** :
    - **Surcharge en tête de talus** : La construction d'un bâtiment ou le dépôt de matériaux en haut d'une pente augmente la force motrice.
    - **Excavation en pied de talus** : La réalisation d'une tranchée ou le terrassement en bas de la pente supprime une partie du sol qui contribuait à la stabilité (butée de pied), diminuant la résistance globale.
    - **Modification du drainage** : La concentration des eaux de ruissellement ou la création de fuites dans des canalisations peuvent saturer localement le sol.
    - **Vibrations** : Le trafic lourd ou les travaux de chantier peuvent, dans certains cas, déstabiliser des pentes fragiles.
  - **Phénomènes Naturels** : Les séismes sont une cause majeure de glissements de terrain dans les zones actives comme la région des Kivu. L'érosion au pied d'une pente par un cours d'eau peut également la déstabiliser progressivement.

L'analyse de la stabilité des pentes est une discipline essentielle de la géotechnique qui permet, par des calculs basés sur les caractéristiques du sol et la géométrie de la pente, de quantifier le risque de glissement et de concevoir des ouvrages de soutènement (murs de soutènement, ancrages,